

文章编号: 1007-4619 (2004)05-0389-08

AMTIS 大气订正算法

——基于 MODTRAN4.1 与 BRDF 大气订正环

何立明, 李小文, 阎广建, 王 华, 王锦地

(北京师范大学 遥感与 GIS 研究中心; 遥感科学国家重点实验室; 环境遥感与数字城市北京重点实验室, 北京 100875)

摘 要: 基于 *BRDF* 大气订正环的途径和核驱动模型, 用 MODTRAN 创建大气参数查找表(Look Up Table-LUT), 加入地表先验知识, 对 AMTIS (Airborne Multi-angle TIR/NIR Imaging System-AMTIS) 的可见光、近红外波段数据进行了大气订正, 并根据地面数据进行了验证。结果表明, 采用本文算法比基于地表朗伯假定的大气订正能更有效地去除大气影响。

关键词: AMTIS; MODTRAN; *BRDF* 大气订正环; 多角度遥感

中图分类号: P407 **文献标识码:** A

1 引 言

AMTIS 是由中国独立设计、研制的机载多角度多光谱成像系统^[1], 它具有可见光、近红外、热红外三个波段, 采用画幅式的成像方式, 能够提供 9 个观测角度的多角度数据(最大观测天顶角为 65°)。研制 AMTIS 的目的是利用多角度遥感信息提取地表空间结构参数和组分温度, 进而改进农田蒸散及作物缺水指数的计算精度, 开展农作物旱情的遥感监测和森林生物量估算的示范应用, 开拓多角度多光谱遥感的应用领域, 为中国星载多角度传感器的研制作技术准备。

通常, 传感器的信号受到大气分子和气溶胶的吸收和散射作用, 并不能完全真实地反映地表 *BRDF* 特征。对于机载传感器而言, 由于多了高度这一个参数, 考虑分子和气溶胶的散射和吸收时将更加复杂。因此, 要进行 AMTIS 数据的定量应用, 离不开精确的大气订正。大气订正主要包括两方面的内容, 大气参数的估计和地表反射率的反演^[2]。后者又有两种思路: 基于地表朗伯假定的大气订正和基于地表非朗伯的大气订正。基于地表朗伯的订正, 其基本思路源于 Chandrasekhar 40 多年前的工作^[3], Chandrasekhar 推导的基于地表朗伯的多次反弹公式是近几十年来遥感图像大气订正的主要依

据。基于地表朗伯的大气订正会带来比较大的误差, 尤其是在观测天顶角比较大的情况下。胡宝新等进行了大量的计算机模拟和敏感性分析^[4], Kaufman 和 Vermote 等也分别做了大量研究^[5,6], 都证实了类似的结论。为此, MODIS 的大气订正方案采用了 *BRDF* 订正环的思路^[6]。胡宝新等通过计算机模拟的数据证明了这种方法的有效性^[4,7]。龙飞将这种思路应用到 NOAA 的 AVHRR 数据上^[8]。

早期的 *BRDF* 订正环思路多基于 6S 模型^[9]。李小文在 1996 年发现, 当 6S 的 *BRDF* 模型变成朗伯假定时并不能完全收敛到朗伯假定的公式, 并推导出了迄今最完整的考虑下垫面 *BRDF* 时多次反弹的完整公式^[10], 并证明了 *BRDF* 订正环的收敛性^[11]。鉴于以上原因, 我们倾向于利用 MODTRAN^[12] 来创建 LUT, 进行大气订正。另外由于 6S 没有热红外部分的大气模型, 采用 MODTRAN 可以为以后热红外部分的大气订正进行对比时保持模型的一致性。

在 AMTIS 的大气订正过程中, 有些像元点由于角度采样的不足, 会造成大气订正过程中反照率参数估计不准确, 因此这里将先验知识加入到大气订正过程中。由于核驱动模型^[13] 参数少, 反演方便, 这里采用核驱动模型来计算反照率参数。考虑到速度问题, 我们把大气订正需要的相关大气参数做成 LUT, 以加速大气订正过程。最后我们根据 2001 年

收稿日期: 2002-12-04; 修订日期: 2004-04-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(40101020), 国家重点基础研究发展规划项目(G20000C77900), 国家 863 项目(2003AA134040)资助。

作者简介: 何立明(1977—), 男, 博士, 1999 年 7 月毕业于烟台师范学院地理系, 获学士学位; 2001 年 7 月毕业于北京师范大学资源与环境科学系遥感与 GIS 研究中心; 从事地表组分温度反演和大气订正等工作, 已发表相关论文 7 篇。

4 月顺义实验的配套数据进行了验证。

2 数据收集与分析

2001 年 4 月 11 日,进行了 AMTIS 的飞行实验,共获得了顺义地区 9 个航带的数据。飞行航高为 4200m,地表海拔高度一般为 33m;飞行时间从 10:13 到 12:25。航带的经纬度范围为北纬 40°—40°20′,东经 116°26′—117°00′。

数据获取后,首先对其进行了配准^[14],配准后每个像元点大约有几个到三十个观测,像元分辨率最小为 1.36m。根据地面已知目标的 BRDF 观测数据和 MODTRAN4.1 对数据做了辐射标定^[15]。在实际进行大气订正的运算时,直接用反射率单位进行运算要更为方便和便于理解,所以本文以下的运算一般都采用反射率单位。对辐射标定后的数据,将其转换为表观反射率(Apparent Reflectance—AP):

$$\rho^* = \frac{\pi L}{\mu E} \tag{1}$$

式中, L 为传感器整个通道接收到的辐射率。 μ 是当时的太阳天顶角, E 是相应通道范围内大气顶外的太阳辐照度。

在航空飞行的同时,进行了大气参数和地面 BRDF 的同步观测。采用 Analytical Spectral Device (ASD)获取了小麦地的 BRDF 数据。采用反照率仪获取了相应样区的全波段反照率数据。根据探空数据廓线得到了水汽量。从当天探空数据(两次, 11:45、13:30)得到的水汽量为 0.413g/cm², 0.55g/cm²。利用 Sunphotometer,得到了当天随时间变化的 550nm 处的整层大气的气溶胶光学厚度值。得到气溶胶光学厚度后,再根据光学厚度得到水平气象视距,以和 MODTRAN 联系起来(MODTRAN 需要水平气象视距作为输入参数)^[16]:

$$\frac{1}{\tau_{550}} = a \cdot VIS + b \tag{2}$$

其中 VIS 是水平气象视距, τ_{550} 是 550nm 处的气溶胶光学厚度, a , b 的值如表 1 所示。

表 1 水平气象视距和垂直气溶胶光学厚度关系式的参数(中纬度夏季模式)

Table 1 The coefficient of formula (2)for MODTRAN Mid-Latitude Summer		
季节	a	b
春夏	0.1202185	0.29737303
秋冬	0.1418833	0.13768914

顺义实验飞行期间最小的光学厚度为 0.2635,最大值为 0.3573,相应的,根据式(2)计算的地表的水平气象视距为 29.0945km 和 20.8071km。

本文选取了顺义地区小样地及其附近区域数据进行大气订正实验。

3 基于地表朗伯的大气订正

基于地表朗伯的大气订正公式^[3]为:

$$\rho_{\text{toa}}(\mu_v) = \rho_a(\mu_s, \mu_v) + \frac{R}{1 - RS} T(\mu_s) T(\mu_v) \tag{3}$$

式中, μ_s 和 μ_v 分别为太阳天顶角和观测天顶角的余弦, ρ_a 是阳光进入大气顶部后,向传感器方向的路径散射的反射率, R 是地表反射率, S 是整层大气对地表上行辐射向下的反射率, $T(\mu_s)$ 和 $T(\mu_v)$ 分别为太阳入射方向和观测方向总的透过率, ρ_{toa} 是大气顶部的表观反射率。由上式,要得到 R ,需要计算的参数为 ρ_a , $T = T(\mu_v) T(\mu_s)$, S 。因此,需要为上面三个参数建立查找表。根据文献[17],运行三次的 MODTRAN,地表反射率分别设为 0, 0.5, 0.8 来得到。

对多角度遥感而言,比起 TM 等单角度天顶观测的传感器,LUT 中多了观测天顶角和方位角两个变量,创建 LUT 的工作量将增大两个数量级以上,所以减小创建 LUT 的时间是非常重要的。仔细检查三个参数不难发现, S 是大气的固有性质,在固定的大气和气溶胶类型下,它仅是水平气象视距的函数(我们模拟的结果证明了这一点)。我们可以首先用天顶观测的三次 MODTRAN 运行得到 S ,单独为其创建 LUT。为了保持解的稳定性,在创建 S 的 LUT 时,可以运行多种反射率,这样问题就变为从大于三个观测数中拟合三个参数。在得到 S 随气溶胶的变化后,再创建 ρ_a 和 T ,只要运行两次 MODTRAN 就足够了。由于创建 S 的 LUT 的时间远远小于创建 ρ_a 和 T 的 LUT 时间(相差 2 个数量级),可节约近似 1/3 的时间。

对于 ρ_a 和 T ,在固定的大气模式和气溶胶模式下,是太阳天顶角、观测天顶角、相对方位角、水平气象视距、水汽含量等的函数。由于飞行当天水汽含量的时间变化非常小,本文暂时将水汽含量固定为 0.5g/cm²。最后,创建 LUT 时参数设置的间隔为:

太阳天顶角: 32, 37, 42(°)共三个;

观测天顶角: 0, 10, 20, 30, 40, 45, 50, 55, 60, 65(°)共 10 个;

相对方位角: 0, 5, 10, 20, 30, ..., 170, 175,

180(°)共 20 个;
水平气象视距:20,23,30(km)。
根据以上参数间隔运行 MODTRAN,创建 LUT。当前 LUT 最大的维数为 4 维,随着实际飞行次数的增大和飞行时相关参数的范围的扩大,我们可以将逐次模拟创建的 LUT 添加到原来的 LUT 中。在得到 LUT 后,3 个大气参数的值将由插值得到。

4 基于 BRDF 订正环的大气订正方法

如引言所述,基于朗伯假定下的大气订正会有较大的误差^[7],尤其是在 AMTIS 这样存在大的观测天顶角的情况下。为此本文采用基于 BRDF 订正环的思路进行大气订正。

4.1 基于地表非朗伯的多次反弹模型

李小文等根据多次反弹的概念推导出了考虑下垫面 BRDF 时表观反射率的迄今最完整的表达式^[10]:

$$\rho^* = \frac{F^+}{F^-} = \rho_{dd} + \frac{T(i)RT(v) - T(i)|R|T(v)}{1 - R_{ff}\rho_{ff}^+}$$
$$R = \begin{bmatrix} R_{dd} & R_{df} \\ R_{fd} & R_{ff} \end{bmatrix}; |R| \text{ 是相应矩阵对应的行列式}; \rho^*$$

是传感器在大气顶部观察到的反射率,ρ_{dd}是阳光进入大气顶部后,向传感器方向的路径散射的反射率;t_{dd}(i)是阳光直射穿透大气层的透过率,t_{dd}(v)是地表反射穿过大气到达传感器的透过率;ρ_{ff}⁺是地表散射光向上遭遇大气的路径反射;R_{ff}是地表的半球反射率(扇入扇出);T(i),T(v)和R则分别是大气的下行传输,上行传输矩阵和地表的方向反射矩阵。其余下标 df 表示直入扇出(方向-半球),fd 表示扇入直出(半球-方向)。换言之,R_{df}是给定入射方向半球反射的平均,R_{fd}是给定观察方向半球入射的平均,R_{ff}则是 BRDF 对输入输出双半球的平均。上式的物理意义为传感器观察到的辐射是路径反射,和路径透射的两项到达地表的反射(共计 5 项),再加上地表两项扇出激起的多次反弹。上式分子的第二项是视地表为 Lambert 表面的多次反弹公式把直入直出项也包括进多次反弹所引起的误差,因而在地表 R_{dd}R_{ff}≈R_{fd}R_{df}时可以大大简化为:

$$\rho^* \approx \rho_{dd} + \frac{T(i)RT(v)}{1 - R_{ff}\rho_{ff}^+}$$
 (5)

在做大气订正时,通常我们假定所有的大气参数均为已知,ρ^{*}是观测值。困难在于 R 未知,包含一个未知的二向性反射 R_{dd}和地表 BRDF 的 3 个平均值,一共 4 个未知数。上式在假定地表朗伯的情况下,可以收敛到式(3)。

4.2 BRDF 大气订正环的基本思路

基于 BRDF 大气订正环的思路,根据 AMTIS 一个像元点的多个观测,在朗伯假定下大气订正后,用来拟合一个 BRDF 模型,可以根据 BRDF 模型(此处选取核驱动模型)得到 R 中的 4 个参数的预期值^[11]。定义 3 个参数用以约束 BRDF 的形状:

$$c_0 = \frac{R_{df}}{R_{dd}}, c_1 = \frac{R_{fd}}{R_{dd}}, c_2 = \frac{R_{ff}}{R_{dd}}, \text{ 写成均值比矩阵}$$
$$K = \begin{bmatrix} 1 & c_0 \\ c_1 & c_2 \end{bmatrix}, \text{ 则 } R = K \cdot R_{dd}.$$

将这 3 个参数带入上述方程,就可以解出初次 BRDF 订正值 r 为:

$$r = \frac{\rho^* - \rho_{dd}}{T(i) \cdot K \cdot T(v) + (\rho^* - \rho_{dd})c_2\rho_{ff}} \quad (6)$$

得到的 r 可以进入 BRDF 订正环的下次迭代,李小文证明了这个迭代过程的收敛性^[11]。详细过程(见图 1)如下:

- 1. 进行朗伯假定下的大气订正;
- 2. 根据 BRDF 的大气参数 LUT 得到六个大气参数;
- 3. 根据上次订正结果反演 BRDF 模型参数;
- 4. 根据拟合得到的 BRDF 模型参数,计算 R_{df}, R_{fd}, R_{ff}的值,得到均值比矩阵;
- 5. 根据均值比矩阵和式(6)得到 R_{dd};
- 6. 重复 3—5 步直到收敛为止。

4.3 BRDF 订正环大气参数 LUT 的创建

进行 BRDF 订正的第二步是得到 6 个大气参数,其中大气路径反射率(ρ_a)、大气向下的反照率 S 可以参照朗伯订正的 LUT,另外 4 个大气参数的创建方法如下。

4.3.1 直射透过率 t_{dd}(i)和 t_{dd}(v)

在固定大气类型和气溶胶类型后,对 t_{dd}(i),它是水平气象视距和太阳天顶角的函数;对 t_{dd}(v),则是高度、水平气象视距和观测天顶角的函数,由于在飞行过程中传感器高度不变,这里设其为常量。AMTIS 是宽波段的传感器,对于宽波段的透过率,这里定义

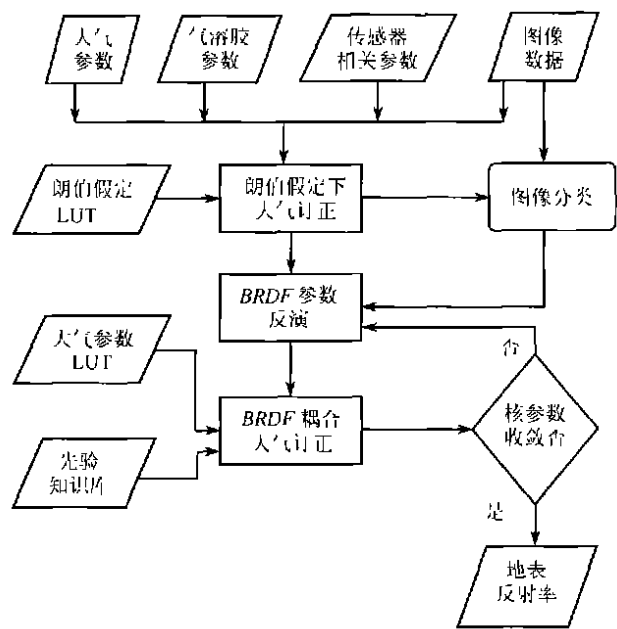


图 1 基本算法流程图

Fig. 1 The flow chart for Atmospheric Correction based on BRDF Loop

其为光谱透过率对传感器通道响应函数的权重积分。光谱透过率可以在给定其它参数后运行 MODTRAN 透过率模式得到。在给定通道响应函数后,MODTRAN4.1 也可直接给出整个波段的消光,从而可以得到整个波段的透过率^[12]

$$AVERAGE\ EXTINCTION=1-TRANS \quad (7)$$

对传感器路径创建的 LUT 的大小为 8×14 (8 种水平气象视距和 14 个观测角度)。对地面到太阳路径的 LUT 的大小为 8×4 (8 种水平气象视距和 4 个太阳天顶角)。

4.3.2 漫射光透过率 $t_{\text{df}}(i), t_{\text{fd}}(v)$

对宽波段的传感器,定义:

$$T_{\text{df}} = \frac{E_{\text{sol}}^{\text{diff}}(\theta_s)}{\mu_s E_s} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) E_{\text{diff}}(\lambda) d\lambda}{\mu_s \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) E(\lambda) d\lambda} \quad (8)$$

这里, $E(\lambda)$ 是传感器波段范围内大气顶的光谱太阳辐射通量, $E_{\text{diff}}(\lambda)$ 是到达地表的太阳光的散射通量, μ_s 是太阳天顶角的余弦, $S(\lambda)$ 是传感器的通道响应函数。 $E_{\text{diff}}(\lambda)$ 可以从 MODTRAN 的 flx 文件中得到,它是水平气象视距和太阳天顶角的函数。

类似地,可以定义 $t_{\text{fd}}(v)$,它是水平气象视距和观测天顶角的函数,这个值无法从 MODTRAN 直接得到。根据互易原理,模拟太阳天顶角在 0 到 65° 下的直射光和地表散射光的比值。使用时,将半球方向透过率用相应太阳天顶角的方向半球透过率来代替。

4.4 核驱动模型和 3 个地表参数($R_{\text{df}}, R_{\text{fd}}, R_{\text{ff}}$)的获取

本文采用核驱动模型来拟合地表的 BRDF。核驱动模型是用有一定物理意义的核的线性组合来拟合地表的二向性反射特征。简单的说,核驱动模型可以用下式表示^[12]:

$$R(\theta_i, \theta_v, \varphi) = f_{\text{iso}} + f_{\text{geo}} k_{\text{geo}}(\theta_i, \theta_v, \varphi) + f_{\text{vol}} k_{\text{vol}}(\theta_i, \theta_v, \varphi) \quad (9)$$

其中 R 为二向反射率, k_{geo} 为几何光学核, k_{vol} 为体散射核,都是光线入射角和观察角的函数。 θ_i 为入射天顶角, θ_v 为观测天顶角, φ 为相对方位角。 $f_{\text{iso}}, f_{\text{geo}}, f_{\text{vol}}$ 是常系数,分别表示各项同性散射,几何光学散射、体散射这三部分所占的比例(权重)。核驱动模型通过线性回归,反演出拟合观测数据最优的 $f_{\text{iso}}, f_{\text{geo}}, f_{\text{vol}}$,然后通过核的外推可求出任意光线入射角和观察角的二向反射。计算反照率时,因为核是与待反演参数无关的函数,核的积分可预先求出,只要把核的积分以 $f_{\text{iso}}, f_{\text{geo}}, f_{\text{vol}}$ 为权重相加,就得到相应的直入扇出(R_{df})或扇入扇出反照率(R_{ff})。

本文选取 RossThick-LiTransit 的核组合来拟合观测数据^[18]。LiTransit 核有与 LiSparse 核相当的数据拟合能力,外推到大的天顶角时有 LiDense 核的稳定性;与 LiSparseR 核相比, RossThick-LiTransit 的核组合更能反映直入扇出反照率随太阳天顶角变化的趋势。

对于扇入直出反照率(R_{fd}),则需要知道天空光

的分布的相对强度。在假定天空光各项同性的情况下,它是三个核系数和观测天顶角的函数,公式形式如下:

$$R_{fd} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^1 \mu [f_{iso} + f_{geo} k_{geo}(\mu, \mu_v, \varphi - \varphi') + f_{vol} k_{vol}(\mu, \mu_v, \varphi - \varphi')] d\mu d\varphi'}{\int_0^{2\pi} \int_0^1 \mu d\mu d\varphi'} \tag{10}$$

将核参数分离:

$$\begin{aligned} R_{fd} &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 \mu [f_{iso} + f_{geo} k_{geo}(\mu, \mu_v, \varphi - \varphi') + f_{vol} k_{vol}(\mu, \mu_v, \varphi - \varphi')] d\mu d\varphi' \\ &= f_{iso} + \frac{f_{geo}}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^1 \mu [k_{geo}(\mu, \mu_v, \varphi - \varphi')] d\mu d\varphi' + \frac{f_{vol}}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^1 \mu [k_{vol}(\mu, \mu_v, \varphi - \varphi')] d\mu d\varphi' \end{aligned} \tag{11}$$

由于对每个观测都要计算 R_{fd} , 进行积分将耗费大量的时间, 因此通过 LUT 的途径来完成, 对 (11) 式中的二重积分, 按照观测天顶角和方位角的一定间隔创建 LUT, 在具体计算时, 通过插值得到核的积分, 最后每个观测角度的 R_{fd} 可以确定:

$$R_{fd} = f_0 + \frac{f_1}{\pi} \cdot K_{geo}(\mu, \mu_v, \varphi - \varphi') + \frac{f_2}{\pi} \cdot K_{vol}(\mu, \mu_v, \varphi - \varphi') \tag{12}$$

K_{geo} 和 K_{vol} 分别对应式 (11) 中的积分。

4.5 相关参数的尺度问题与 BRDF 大气订正环公式相关参数的调整

4.1 节公式中各参数的空间尺度是不一样的。 ρ_{ff}^+ 的空间尺度取决于气溶胶的变化尺度, 可以取数公里范围内的平均值; R_{ff} 影响多次反弹的尺度也应该是数公里范围上的^[10], 它可以通过地表各像元的 R_{ff} 与同空间距离有关的一个权重函数卷积得到 (可以取大气的 PSF), 表示的是大范围内起多次反弹作用的平均效果, 对于低分辨率的图像来说, R_{ff} 仅仅取决于与其相邻的数为几十个像元。对于 AMTIS 1.36m 分辨率的图像, R_{ff} 应该与中心像元相隔数百米到公里尺度上所有像元的加权平均。 t_{df} 、 t_{fd} 、 ρ_{dd} 三个大气参数也是取决于气溶胶的空间变化。对于大气参数, 此处不再做详细的讨论。

根据以上讨论, 在地表某个像元点的 BRDF 订正中, 假定 R_{ff} 为固定值, 则 BRDF 订正环的迭代公式可以变为:

$$r = \frac{(\rho_{toa} - \rho_{dd})(1 - R_{ff} \rho_{ff}^+)}{T(i)KT(v)} \tag{13}$$

采用上面公式在进行 AMTIS 基于地表 BRDF 的大气订正前, 需要首先确定 R_{ff} 这个决定地气之间多次反弹的参数。而 R_{ff} 是通过核驱动模型反演的核系数得到的, 核系数在 BRDF 订正中会不断地改

变, 因此, 需要首先根据朗伯订正的结果反演得到 R_{ff} 或者根据前面 BRDF 迭代公式 (6) (暂时假定 R_{ff} 与环境无关) 得到初步的 R_{ff} , 对其根据距离加权后, 再根据式 (13) 进行最后的 BRDF 订正。

4.6 先验知识的利用和收敛的判据

进行基于 BRDF 的大气订正主要是针对植被等非朗伯地物的。这里对先验知识的利用主要是得到植被的核参数的先验分布。为此先进行图像分类以区分开植被和非植被。根据分类结果, 选取典型地块, 得到不同种类地物 (主要是植被) 核参数的先验分布, 做成 LUT, 供进行反演时少数像元点观测数不足时使用。当反演得到的反照率大于 0.8 或者小于 0.0, 或者核系数不在先验合理范围时, 用先验知识对反演过程加以约束。

对于核驱动模型来说, 在可见光波段, 几何光学核系数是最敏感的参数, 而在近红外波段, 体散射核系数是最敏感的参数。这里, 当前后两次反演的核驱动模型相应波段最敏感的核系数的差值小到一定阈值 (ϵ) 时, BRDF 订正退出迭代过程:

$$\begin{aligned} |f_{vol}(n+1) - f_{vol}(n)| &< \epsilon_{nir}, \\ |f_{geo}(n+1) - f_{geo}(n)| &< \epsilon_{vis} \end{aligned} \tag{14}$$

n 和 $n+1$ 分别表示第 n 次和第 $n+1$ 次迭代。在迭代过程中, 如果发现得到的核系数或者反照率超出一定阈值 (非常大或者非常小), 则采用先验知识加以约束, 当迭代达到一定次数后, 如果尚未达到上述收敛条件, 则退出循环, 订正结果用朗伯订正的值代替。当前的迭代次数设置为最多 9 次, 一般来说, 可见光波段迭代小于 5 次即可收敛 ($\epsilon_{vis} = 0.007$), 近红外波段迭代 4 次即可收敛 ($\epsilon_{nir} = 0.001$)。

5 验 证

由于 AMTIS 是宽波段的传感器,在进行验证时,需要将地表光谱的 *BRDF* 转换为 AMTIS 宽波段的 *BRDF* 后才能进行验证,采用公式为:

$$\rho_{\text{AMTIS}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) d\lambda}$$

(15)

式中, λ_1 和 λ_2 是 AMTIS 的相应波段的起止波长, $S(\lambda)$ 是通道响应函数, $\rho(\lambda)$ 是 ASD 测量的光谱 *BRDF* 值, ρ_{AMTIS} 表示转换后的 *BRDF*。

根据(15)式,我们得到了由小样地(麦地)ASD 测量数据转换得到的 AMTIS 波段对应的观测值,并同相应点的 AMTIS 图像数据进行了比较,结果如图 2 所示。从订正结果看,朗伯订正值和 *BRDF* 订正值整体上均与地表观测值不是完全吻合,其原因可能为由辐射标定带来的整体的系统误差(辐射标定系数的误差导致表观反射率的降低),以及 AMTIS 图像点和地表观测点不完全一致带来的误差(AMTIS 的最高分辨率为 1.36m,而 ASD 的视场角比较小,在多角度观测时其不同角度的观测可能没有完全对准同一目标)等导致。另外,在进行地表 *BRDF* 测量时,由于大气散射光的影响,也会使地物 *BRDF* 的形状受到影响。

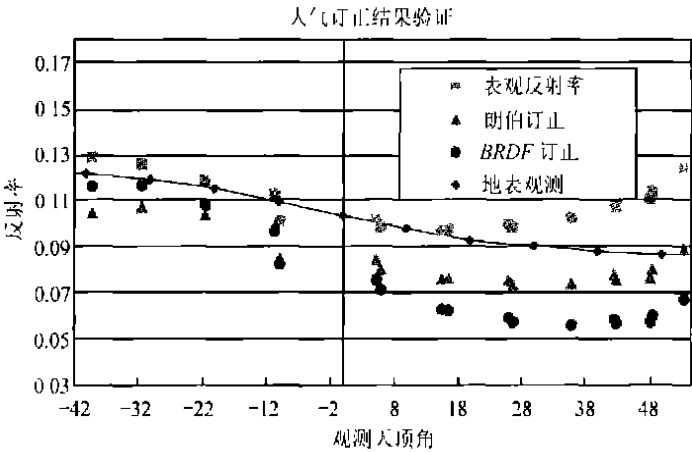


图 2 地表同一个点订正前后的 *BRDF*

Fig. 2 Comparison for a pixel before and after the atmospheric correction

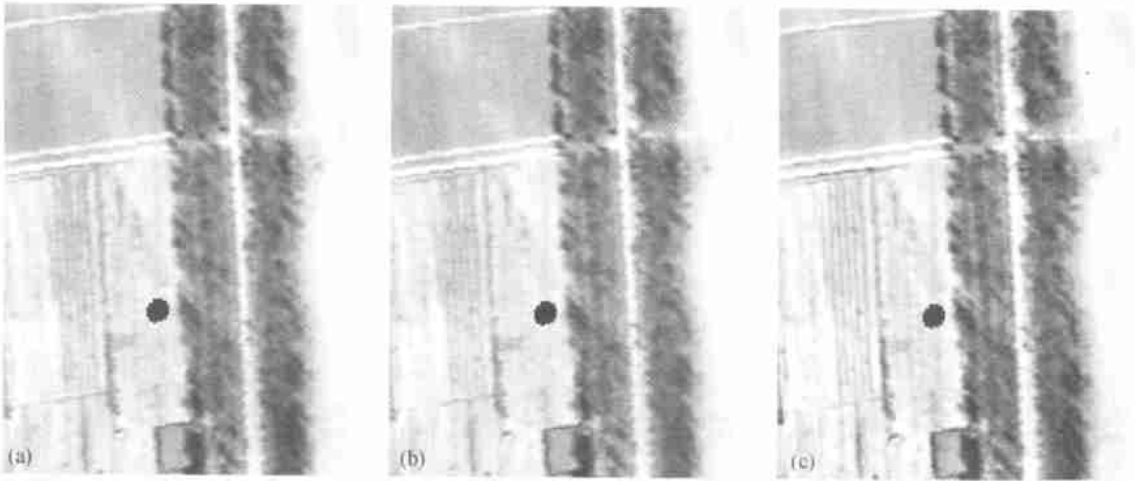


图 3 订正前后图像的比较((a)表现反射率;(b)朗伯订正;(c) *BRDF* 订正环)

Fig. 3 Images of apparent reflectance (a), Lambert (b) and *BRDF* Loop Based(c) Atmospheric Correction

对朗伯订正和 *BRDF* 订正结果进行比较发现,对于接近天顶方向的观测,朗伯订正的结果和 *BRDF* 订正结果相差不大;而在观测天顶角比较大时,两种大

气订正得到的结果有较大差别。一般规律是,在大的地表反射时(此处为后向观测),*BRDF* 订正值大于朗伯订正值,而在小地表反射率时(此处是前向观测),

BRDF 订正值小于朗伯订正值。总的趋势是大气对地物的 BRDF 有强烈的“平滑”作用,削弱了“碗边”效应,而 BRDF 订正则有效恢复了地物真实的 BRDF 形状,这与李小文的理论分析是一致的^[11]。近红外波段的验证结果也说明了这一趋势,由于篇幅限制,不再给出图示。作为说明,我们给出部分 AMTIS 可见光波段订正前后的图像(图 3(a), (b), (c))。可以看出,订正后,图像左边高频成分变多,垄之间分界线变得更清晰(去“平滑”作用),这从另一个方面说明 BRDF 订正有效恢复了地表的真实面目。

6 讨论与结论

1. 同地表测量和朗伯订正结果相比较,采用本文的 BRDF 订正,有效去除了大气对地表 BRDF 强烈的“平滑”作用。

2. 当前尚未进行交叉辐射项的订正,但是从订正前后的图像可以看出,订正后图像的高频分量增大,不同地物之间的边缘更清晰,这从另一方面说明采用本文方法有效恢复了地表的本来面目。

3. 本文初步考虑了 R_{ff} 这个决定地气之间多次反弹参数的空间尺度问题。对于高分辨率图像的大气订正,考虑地气之间的多次反弹和像元间的交叉辐射项的影响的尺度问题仍是一个值得研究的方向。

4. 能否直接从表观反射率直接进入 BRDF 的迭代,而不进行基于地表朗伯的订正。之所以先采用朗伯订正,因为其结果可以为进一步选取适合的 BRDF 模型提供先验知识。由于本文只用了拟合能力较强的 LiTransit-RossThick 的核组合,实验结果表明,采用表观反射率直接进入迭代,与用朗伯订正后的值进入迭代,结果相差很小,但是收敛要慢 1—2 次(在初次反演核驱动模型系数时,直接用表观反射率拟合核驱动模型系数失败的机会多,要更多依靠先验知识),最后得到的核系数值相差非常小。总体来说,先采用朗伯订正后结果更为稳定。

致谢 在本文完成过程中,肖青提供了 AMTIS 辐射标定系数,刘强等提供了配准后的数据,在此一并致谢。

参考文献 (References)

- [1] LI X W, WANG J F, WANG J D, et al. Multi-angle and Thermal Infrared Remote Sensing[M]. Science in China Press, 2001, 3. [李小文(王骏发)王锦地等.多角度与热红外对地观测.科学出版社[M]. 2001年3月]
- [2] Asrar, Ghassem. Theory and Application of Optical Remote Sensing [M]. A Wiley-Interscience Publication, Chapter 9, 1989.
- [3] Chandrasekhar S., Radiative Transfer, New York, Dover, 1960.
- [4] HU B X, LI X W, ZHU C G. A Atmospheric Correction Algorithm Based on BRDF-Loop[J]. Remote Sensing of Environment in China, 1996, 11(2): 151—159. [胡宝新, 李小文, 朱重光. 一种大气订正的方法: BRDF 大气订正环, 环境遥感[J]. 1996, 11(2): 151—159.]
- [5] Lee T Y, Y J Kaufman, Non-Lambertian effects in remote sensing of surface reflectance and vegetation index [J]. IEEE trans on Geoscience and Remote Sens., 1986, 24: 699—708.
- [6] Vermote E F L A Remer, C O Justice, Y L Kaufman, D Tanre, Algorithm technical background Document: atmospheric correction algorithm[R]. MODIS Science Team and Associates, 1995.
- [7] HU B X, WANG L Ch, LI X W, et al., The Sensitivity of Atmospheric Correction of Reflectance to the Surface BRDF [J]. Journal of Remote Sensing, 1997, 1(supp.): 187—191. [胡宝新, 王乐驰, 李小文等. 大气订正对获取地表 BRDF 的敏感性[J]. 遥感学报, 1997, 1(增刊), 187—191]
- [8] LONG F, ZHAO Y S, Atmospheric correction of Multi-angle NOAA Data Based on BRDF Reflectance [J]. Journal of Remote Sensing, 2002, 6(3): 173—178 [龙飞, 赵英时, 多角度 NOAA 卫星数据地面 BRDF 反射率的大气校正[J]. 遥感学报, 2002, 6(3): 173—178]
- [9] Vermote E, Tanre D, et al. 6S User Guide, Version 2[M]. 1997, 7.
- [10] LI X W, NI W G, et al. Decoupling path-scattering of light in a homogeneous layer and multiple bouncing at its non-Lambertian bottom[J]. Science in China (Ser. E), 1996, 26(5): 457—466. [李小文, 倪文革等, 光在介质层中的路径散射及在下垫面的多次反弹[J]. 中国科学(E), 1996, 26(5): 457—466.]
- [11] LI X W, On Convergence of BRDF-based Atmospheric Correction Loop[J]. Journal of Remote Sensing, 1998, 2: 10—12. [李小文, BRDF 大气影响订正环的收敛性研究[J]. 遥感学报, 1998, 2: 10—12.]
- [12] Berk A, Anderson G P, Acharya P K et al. MODTRAN User's Manual[M]. Version 4.1, 1, 1999, 6.
- [13] Wanner W, Li X, Strahler A. On the derivation of kernels and kernel-driven models of bidirectional reflectance [J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100(D10): 21077—21089.
- [14] LIU Q, LIU Q H, XIAO Q, et al. Research for the Geometry Correction of Airborne Multi-angle Remote Sensing Image [J]. Science in China, (D)2002, 45(12): 1075—1086.
- [15] XIAO Q. The Quantitative Research of Airborne Remote Sensing Data. Dissertation for Academy of Sciences in China[D], 2002, 6. [肖青. 机载遥感数据的定量化研究, 中国科学院博士学位研究生学位论文[D], 2002, 6]
- [16] HE L M, et al. The Relative between Aerosol Optical Depth and Visibility and its Application[J]. Journal of Remote Sensing, 2003, 7(5): 375—378. [何立明等, 气溶胶光学厚度与水平气象视距的相关分析及其应用[J]. 遥感学报 2003, 7(5): 375—378].
- [17] Liang J, Fang H, Li Chen, M Z. Atmospheric correction of Landsat ETM+ Land surface Imagery: I. Methods [J]. IEEE Trans. On Geo. And Remote Sensing, 2001, 39(11): 2490—2498.

[18] LI X W, GAO F, LIU Q, *et al.* Validatin of a New GO Kernel and Inversion of Land Surface Albdeo by Kernel-Driven Model[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2000, 4(supp.):1-7. [李小文, 高峰, 柳钦火等, 新几何光学核的验证以及用核驱动模型反演地表反照率(之一)[J]. 遥感学报, 2000, 4(增刊):1-7.]

Atmospheric Correction for AMTIS Based on *BRDF* Loop and MODTRAN4. 1

HE Li-ming, LI Xiao-wen, YAN Guang-jian, WANG Hua, WANG Jin-di

(*Research Center for Remote Sensing and GIS, School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; State Key Laboratory of Remote Sensing Science; Beijing Key Laboratory for Remote Sensing of Environment and Digital Cities. Beijing 100875, China*)

Abstract: To extract quantitative information from the remote sensed imagery accurately, atmospheric correction that decoupled the surface spectral signature and the aerosol scattering effect is a necessary step. There are several models to describe the multiple bouncing between the surface and atmosphere. But when viewing only from a single direction, we can't get the enough information such as the albedo of surface to decouple the surface signature and aerosol scattering from these models, so a lambert surface has to be assumed and large error may be introduced in the atmospheric correction when the ground is non-lambertian.

This paper describes the atmospheric correction algorithm of AMTIS for the VIS/NIR bands. The algorithm is based on a *BRDF* Loop approach and MODTRAN4.1 is applied to calculate the atmosphere parameters used in the atmospheric correction. The parameters used to decouple the multi-bouncing effect such as direct-hemisphere albedo and hemisphere-direct albedo are estimated in the loop process. The *BRDF* model for calculating albedo is a kernel driven model. To accelerate the atmospheric correction, all the atmospheric parameters used in this algorithm are pre-computed with MODTRAN4.1 and saved in the Look-up Table. Prior knowledge is used in the retrieval of kernel-driven model when the prior multi-angle sampling is not enough. The atmospheric correction result is validated using the synchronous ground experiment. The atmospheric correction result shows that this algorithm can wipe off the atmospheric smoothing effect and the *BRDF* shape of ground surface is reversed effectively.

Key Words: multi-angle; AMTIS; atmospheric correction; *BRDF* atmosphere Loop; MODTRAN4.1